

순환최소자승법을 이용한 직류도시철도 변전소의 가선전압변동 모델링

배창한[†]

Modelling Voltage Variation at DC Railway Traction Substation using Recursive Least Square Estimation

Chang-Han Bae[†]

Abstract

The DC overhead line voltage of an electric railway substation swings depending on the accelerating and regenerative-braking energy of trains, and it deteriorates the energy quality of the electric facility in the DC railway substation and restricts the powering and braking performance of subway trains. Recently, an energy storage system or a regenerative inverter has been introduced into railway traction substations to diminish both the variance of the overhead line voltage and the peak power consumption. In this study, the variance of the overhead line voltage in a DC railway substation is modelled by RC parallel circuits in each feeder, and the RC parameters are estimated using the recursive least mean square (RLMS) scheme. The forgetting factor values for the RLMS are selected using simulated annealing optimization, and the modelling scheme of the overhead line voltage variation is evaluated through raw data measured in a downtown railway substation.

Key words: DC railway substation, Overhead line voltage, Feeder current, Recursive least square estimation

1. 서 론

도심지 전기철도 직류변전소의 경우, 전동차들은 짧은 운행시각과 구배와 같은 선로조건에 따라 다양한 견인 및 제동 토크 패턴 형태를 가지며 운행된다. 이로 인해 전력공급을 위한 가선전압은 크게 변동되고 이러한 급격한 변동은 부하에 해당되는 지하철 전동차들 뿐만 아니라 각종 전력 및 가선설비에도 나쁜 영향을 줄 수 있다. 따라서, 전기철도 변전소는 SCADA를 사용해 가선전압을 상시 모니터링하며, IEC 60850에서 제시한 기준 범위로 관리하고 있다^[1,2]. 또한 전기철도변전소의 부하에 해당하는 전동차들은 추진제어장치의 동작을 가선전압변화에 연동하도록 운행하고 있다. 즉, 가선전압이 낮아지는 경우, 추진제어장치의 역행 견인력을 기준 값보다 감소시키고, 높아지는 경우에는 회생제동력 최대값을

제한하고, 이로 인해 감소된 제동력은 공압을 이용한 마찰제동력으로 보상하는 방식이 사용되고 있다. 냉난방환기장치를 비롯한 각종 서비스 기기와 공기 압축기의 전원으로 사용되는 보조전원장치의 경우에도 가선전압이 낮아지는 동안 출력 교류전압 및 주파수를 감소시켜 부하기기들의 동작을 지속시키는 방식들이 적용되기도 한다. 이상과 같이 추진제어장치와 보조전원장치의 가선전압의 상승 및 하강에 따른 제한된 동작 구현에도 불구하고, 변전소 가선전압이 급격한 상승될 경우에는 전철 변전소와 전동차에 설치된 각각의 회생제동저항기를 일정 패턴으로 투입하여 전압을 제한하는 수동적 방식이 사용될 수 있다. 한편 최근에는 리튬배터리, 이중층캐패시터, 플라이휠 등의 다양한 에너지 저장장치 또는 회생용 인버터장치등을 변전소에 추가로 설치하여 잉여 회생전력을 흡수 및 재활용으로써 가선전압을 안정화시키고 피크소비전력을 저감하는 능동적 방식등도 활발히 도입되고 있다^[3~5]. 이러한 회생전력 재활용 장치들은 전기철도 노선별로 회생실효율이 다르기 때문에 높은 에너지 재활용과 빠른 투자비 회수를 위해, 정확한 최적의 설치 위치 및 장치의 최적 정격 및 피크용량산정이 필수적이다. 따라서, 전기철도의 전력시뮬레이션 툴로

Paper number: TKPE-2015-20-6-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: chbae@krri.re.kr, Type approval

team, Korea Railroad Research Institute

Tel:+82-31-460-5417 Fax:+82-31-460-5020

Manuscript received Aug. 24, 2015; revised Oct. 6, 2015;

accepted Oct. 29, 2015

다양한 운행조건에 대한 회생실효량을 예측하고, 에너지 흡수 및 저장장치에 대한 적정 용량을 선정하고 있다^[6,7]. 신규 노선의 경우에는 TPS(Train Performance Simulation) 및 전력시뮬레이션을 통한 회생실효량 예측이 용이하지만, 다양한 형식의 전동차들이 혼재되어 운행중인 기존 노선의 경우에는 이러한 방식으론 정확한 회생실효량 추정이 어렵다. 따라서, 변전소의 실측데이터를 활용한 회생실효량을 예측하는 방식에 대한 연구가 요구되며, 이를 위해서는 회생실효량에 기인한 가선전압 변동에 대한 모델링 및 파라미터 추정이 중요하다.

본 논문에서는 직류지하철 변전소의 부하 변동에 따른 가선전압의 전압변동 모델을 제안하고, 도시철도 직류변전소의 순환최소자승 추정방법을 이용하여 제안된 모델의 파라미터들을 추정한다. 순환최소자승 추정기법에서 요구되는 FF(Forgetting Factor)는 SA (Simulated Annealing) 최적화 기법을 이용해 선정하며, 수도권 도시철도 직류변전소에서 실측된 가선전압과 피더별 전류데이터를 사용해 가선전압 추정치와의 오차를 최소화하는 피더별 RC 병렬회로의 저항 및 정전용량을 추정한다.

2. 가선전압 변동 모델

우리나라 대부분의 전기철도 직류변전소는 다이오드 정류방식을 사용해 1500V 직류전력을 만들고, 상선과 하선을 4개의 피더로 구분하여 부하 전동차들에 전력을 공급한다. 그림 1은 일반적인 도시철도 직류변전소의 전력회로 블록도를 간략하게 나타낸다. 4개의 피더는 각각 상행 및 하행방향의 상하선으로 구분되고, 상호 간에 전류 교류가 가능하도록 구성된다. 그림 2는 직류 지하철 변전소의 가선전압과 4개의 피더 전체 전류와의 관계를 나타낸다. 가선전압은 변압기 및 가선 전기설비의 임피던스 전압강하분으로 인해 피더 전체전류가 증가함에 따라 무부하전압에서 최소전압까지 점차 감소된다. 반면에, 동일가선 상에 회생제동을 실시하는 부하 전동차들이 급격히 증가해, 역행전력보다 회생전력이 크게 되는 경우, 잉여 회생에너지로 인해 가선전압은 무부하전압에서 최대전압까지 급격히 상승하게 된다. 즉, 피더별로 전동차 회생제동시 발생하는 회생전력은 상호 교류하며 소비되지만, 초과된 잉여 회생전력을 소비할 수 있는 부하차량이 타 피더에도 없다면, 가선전압은 급격히 상승하게 된다. 만약 많은 잉여 회생에너지가 가선으로 공급되고 가선전압이 지속적으로 상승하면, 변전소에 내부에 설치된 저항기가 동작하여 가선전압을 최대전압 이하로 유지시키도록 제어한다. 이러한 잉여회생전력에 따른 가선전압 상승은 전동차의 회생제동 이용률을 감소시키며, 피더간의 회생전류 교류 시에도 변전소 및 가선설비의 임피던스에 의한 순간적인 전압상승 및 강하분도 발생

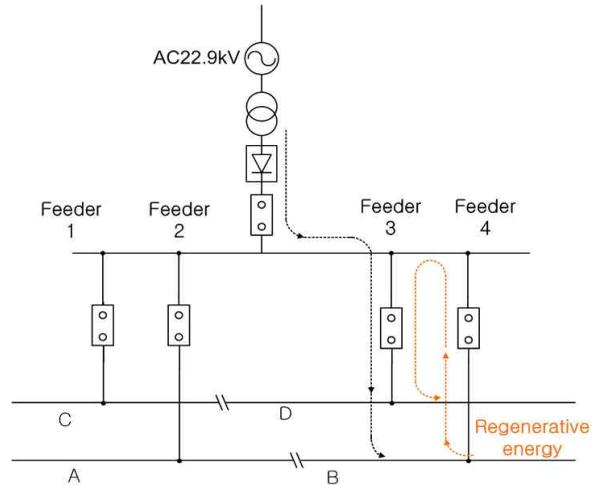


Fig. 1. Schematic block diagram of DC 1500V railway substation.

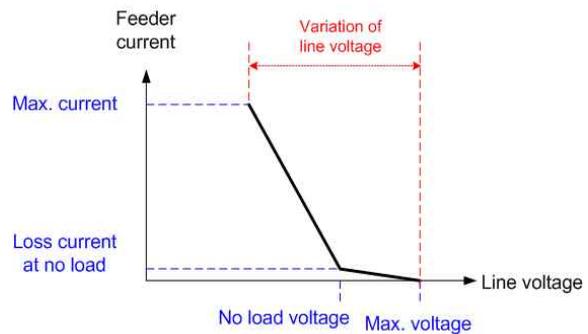


Fig. 2. Overhead line voltage vs. feeder current.

된다. 이러한 직류 지하철 급전설비와 가선의 임피던스 및 회생 전력의 피더간 교류에 따른 가선 전압변동 특성을 피더별 RC 병렬회로를 사용해 모델링하고 각각의 저항 및 정전용량 파라미터들을 추정한다^[8-10].

그림 3은 피더별 전압변동을 모의하기 위한 RC 병렬회로 모델을 나타내며, V_o 는 변전소의 무부하전압을 의미하며, i_1, i_2, i_3, i_4 는 1~4번 피더전류, R_1, R_2, R_3, R_4 는 피더별 저항성분, C_1, C_2, C_3, C_4 는 피더별 정전용량 값을 의미한다. 복잡한 구조의 모델은 정확한 가선전압의 모델링 할 수 있지만, 본 논문에서는 제한된 실측 데이터의 활용과 변전소의 가선전압의 과도상태 모의 목적을 고려해 피더별로 1개의 RC 병렬회로로 구성하였다.

3. 파라미터 추정

지하철 변전소의 가선전압 변동 및 무부하 전압 추정을 위해 순환최소자승법을 사용하였다. 그림 3에서 피더 1개의 전류 및 가선전압에 대한 이산시간 전달함수는 식(1)과 같다. 이 전달함수로부터 계산된 피더별 RC 병렬회로의 저항 및 정전용량은 식(2)와 (3)으로 얻어진다.

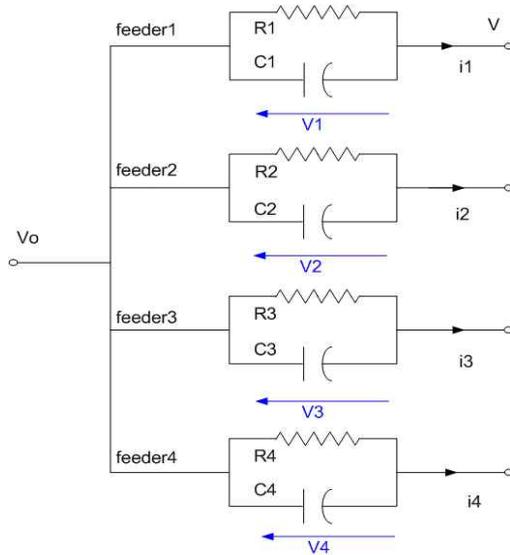


Fig. 3. Variation modelling of line voltage at DC 1500V railway substation.

$$\frac{V(z)}{I_n(z)} = \frac{b_{n0} + b_{n1}z^{-1}}{1 + a_{n1}z^{-1}} \quad (1)$$

$$R_n = \frac{2a_1b_0T_s}{1 - 3a_1T_s} \quad (2)$$

$$C_n = \frac{T_s(1 - a_1)}{4a_1b_0} \quad (3)$$

여기서 T_s 는 샘플링주기[초], n 은 1~4의 값으로 각 피더를 나타낸다.

파라미터 추정을 위한 순환최소자승법의 파라미터 및 입력변수는 식(4) 및 (5)와 같다. 피더별 가선전압 추정치는 식(6)으로 계산되며, 무부하전압은 식(7)로 추정된다.

$$U(k) = \begin{pmatrix} i_1(k) & i_2(k) & i_3(k) & i_4(k) \\ i_1(k-1) & i_2(k-1) & i_3(k-1) & i_4(k-1) \\ (V_o - y)(k-1) & (V_o - y)(k-1) & (V_o - y)(k-1) & (V_o - y)(k-1) \\ E & E & E & E \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\theta(k) = \begin{pmatrix} b_{10} & b_{20} & b_{30} & b_{40} \\ b_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$y_n(k) = b_{n0}I(k) + b_{n1}I(k-1) + a_{n1}[\alpha_{n1}(k-1)E - y_n(k-1)] + \alpha_{n1}(k)E \quad (6)$$

$$V_o(k) = [0 \ 0 \ 0 \ E] \theta(k) \quad (7)$$

여기서 i_1, i_2, i_3, i_4 는 각각 피더-1, 2, 3, 4의 전류 값을 의미하며, y 는 추정된 파라미터로부터 계산된 가선 전압값을 의미한다. E 는 가선의 무부하전압 설정값이며 1550 V로 설정하였다. b_{10}, b_{11}, a_{11} 은 피더-1, b_{20}, b_{21}, a_{21} 는 피더-2, b_{30}, b_{31}, a_{31} 는 피더-3, b_{40}, b_{41}, a_{41} 는 피더-4에 대한 이산시간 전달함수 (1)의 파라미터들이다. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 는 1~4번 피더별 무부하전압 추정을 위한 파라미터이며 추정된 무부하전압 V_o 는 식(7)로 계산된다. 실시간 계측 데이터를 이용해 파라미터 추정을 위해 사용된 순환최소자승 추정수식은 식 (8)~(11)과 같다.

$$K(k) = \frac{\lambda^{-1}P(k-1)U(k)}{1 + \lambda^{-1}U(k)^T P(k-1)U(k)} \quad (8)$$

$$e(k) = y(k) - \theta(k-1)^T U(k) \quad (9)$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k)e(k) + \beta \Delta \theta(k-1) \quad (10)$$

$$P(k) = \lambda^{-1}P(k-1) - \lambda^{-1}K(k)U(k)^T P(k-1) \quad (11)$$

여기서, θ 는 추정파라미터 벡터를 나타내며, e 는 측정된 가선전압과 추정된 가선전압과의 차이를 나타낸다. y 는 측정된 가선전압, K 는 파라미터 추정 게인값, P 는 오차공분산 값이다. $\Delta \theta$ 는 노이즈 저감 및 추정안정성 향상을 위해 적용된 모델링으로, β 는 모델링 효과를 조절하는 상수이며, 발산하지 않기 위해서 -1 ~ 1 범위 내에서 응답특성을 고려해 선택한다.

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{pmatrix} \quad (12)$$

식(12)는 시변 파라미터를 위한 FF(forgetting factor, λ), 이며, 0~1사이의 값으로 1에 가까울수록 파라미터 추정안정성은 향상되지만 응답지연이 커지는 단점이 있으며, 반대로 0에 가까울수록 응답지연은 감소하지만 안정성이 낮아져 발산하기 쉽다. 따라서 적절한 λ 선정을 위한 다양한 적응 순환 최소자승법이 제안되고 있으며, 본 논문에서는 MATLAB에서 제공하는 SA(Simulated annealing) 최적화 방법을 이용하여 고정된 최적화 값으로 선정하였다^[11].

4. 추정 결과

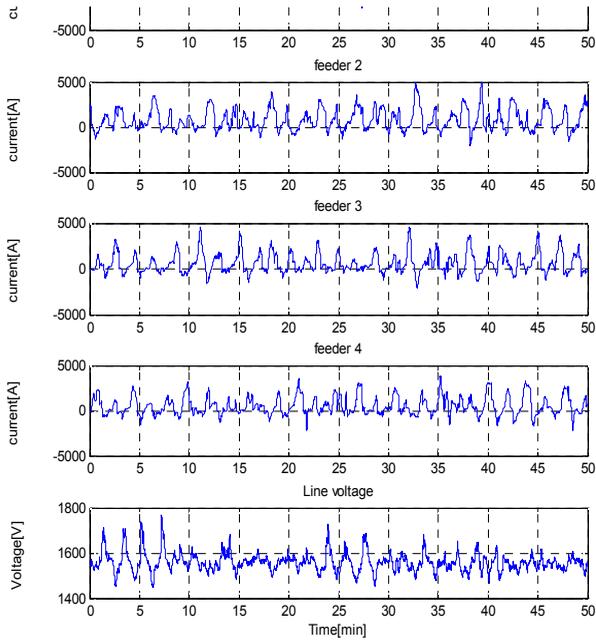


Fig. 4. Line voltage and feeder current waveform at DC 1500V railway substation.

그림 4는 국내 수도권 지하철 직류변전소에서 최소운행 시격 2.5분으로 운행시 측정된 피더 1~4의 전류 및 가선전압 측정 데이터를 나타낸다. 가선 전압과 피더전류는 2 Hz의 샘플링 주파수로 계측되었으며, 운행 시격별 전력분석을 위해 2시간 단위 구분하며 1일간 저장하도록 하였다. 그림 4에서 보듯이, 부하차량의 역행 및 회생제동 동작조건에 따라 4개의 피더전류는 방향이 바뀌고, 가선전압도 급격히 변동된다. 지하철 전동차의 다양한 운행조건에 따라 변전소의 4개 피더에서 역행 및 회생에너지가 복잡하게 수수되고 있다. 피더전류 값이 음의 방향인 경우 해당 피더에서 발생된 회생전류는 다른 피더로 공급되어 역행차량에서 소비되며, 양의 방향일 때에는 해당피더의 부하차량에서 소비 전류가 흘러 가선전압은 감소된다. 또한, 변전소의 가선전압은 4개의 피더별 전류를 합산한 전체 피더전류값의 방향에 따라 증가 또는 감소한다.

SA 최적화 기법을 이용해 순환최소자승법의 FF, λ 를 계산한 결과는 $\lambda_1 = 0.999009$, $\lambda_2 = 0.998986$, $\lambda_3 = 0.998981$, $\lambda_4 = 0.998999$ 로 얻어지며, 그림 5는 SA 최적화 반복에 따른 FF 값과 목적함수 계산 값 추이를 나타낸다. SA 최적화 기법으로 얻은 FF, λ 값과 수도권 지하철 변전소의 측정 데이터를 사용해 순환 최소자승법으로 병렬 RC 모델의 파라미터 및 가선전압 변동분을 추정한 결과를 그림 6~9에 나타낸다.

그림 6은 순환최소자승법의 기준값인 가선전압 측정값과 4개의 피더전류로부터 가선전압 추정 값 파형을 비교 한 것이다. 순환최소자승법으로 추정된 가선전압과

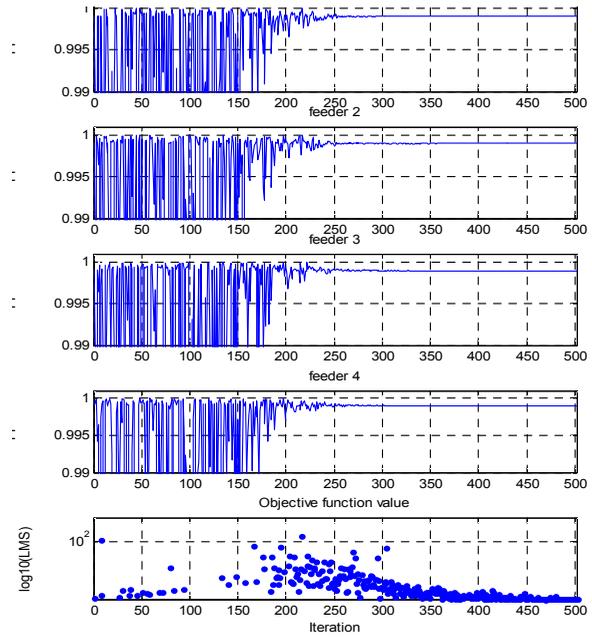


Fig. 5. SA optimization results for optimal FF values (input value range : 0.95~0.9999, maximum iteration : 500, objective function value limit : 100).

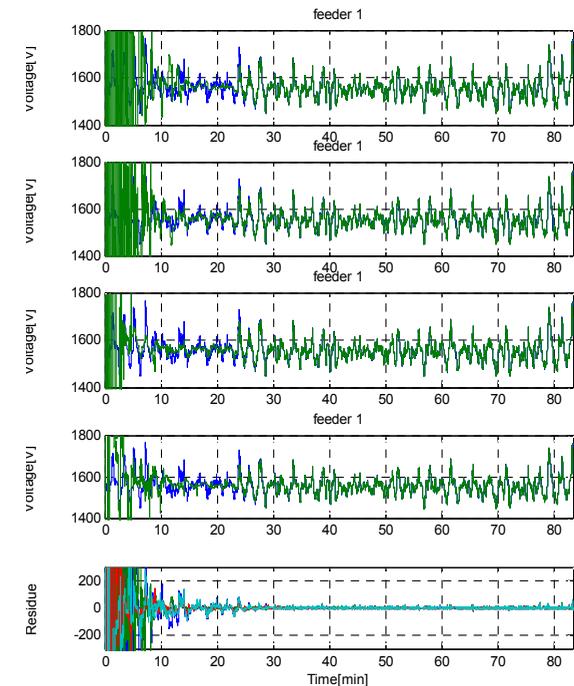


Fig. 6. Line voltage measurement(V_{meas}), feeder current estimation(V_{esti}) and residue ($\beta = 0.85$).

계측된 전압과의 오차가 점차 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그림 7과 8은 피더별 RC 모델의 파라미터를 추정 한 결과를 나타낸다. 가선전압 및 피더전류 입력에 따라 가선전압의 변동분을 모델링한 피더별 RC 파라미터들이

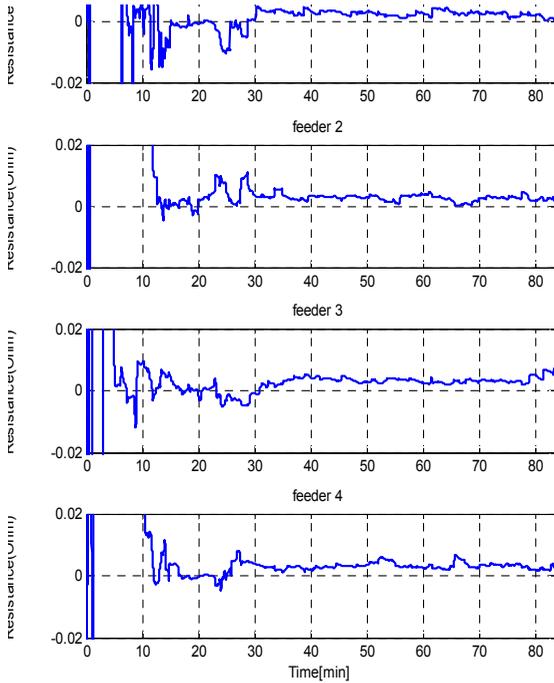


Fig. 7. Parameter estimation(resistance) at feeder 1~4 ($\lambda_1 = 0.999009$, $\lambda_2 = 0.998986$, $\lambda_3 = 0.998981$, $\lambda_4 = 0.998999$).

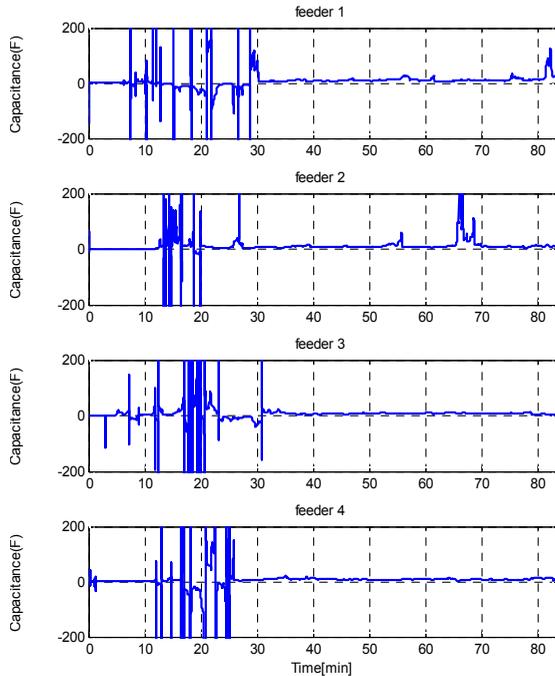


Fig. 8. Parameter estimation(capacitance) at feeder 1~4 ($\lambda_1 = 0.999009$, $\lambda_2 = 0.998986$, $\lambda_3 = 0.998981$, $\lambda_4 = 0.998999$).

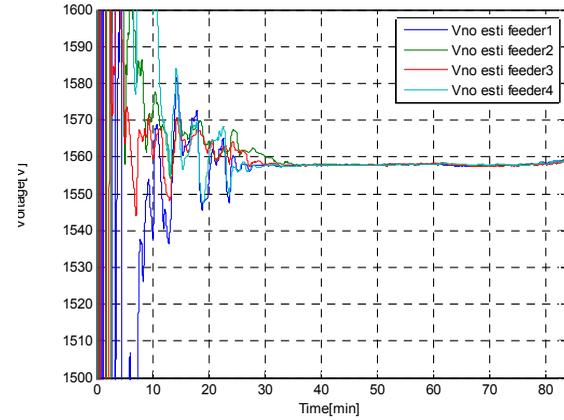


Fig. 9. No-load overhead line voltage estimation at feeder 1~4.

실시간으로 추정되고 있다. 그림 9는 식(7)을 이용해 계산된 피더별 무부하 전압파형을 보여준다. 순환최소자승법에 따라 가선전압 추정오차는 감소되고 무부하전압 추정값도 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 다만 무부하전압 추정 응답속도가 저조한 것을 개선하기 위해 변전소 측정 데이터의 샘플링 주파수를 높이고, 응답특성 개선을 위한 적응 순환최소자승법을 적용한 추가 연구가 요구된다. 향후, 추정된 무부하 전압과 가선전압 실측값을 이용하여 직류지하철 변전소에서 발생하는 회생실효량을 정확히 추정하는데 사용될 수 있다.

5. 결 론

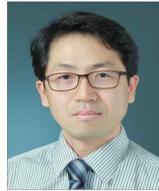
지하철 차량의 복잡한 운행패턴과 피더간의 회생전력 수수로 인해 발생하는 가선전압의 급격한 전압변동폭을 피더별로 RC 병렬회로를 적용해 모델링하였다. 제안된 모델의 파라미터들을 추정하기 위해 순환최소자승법을 이용했으며, 순환최소자승법의 FF값은 SA 최적화 기법으로 계산된 고정 값으로 선정하였다. 제안된 모델과 파라미터 추정방법에 대한 검증은 위해서, 직류변전소에서 실측된 가선 전압 및 피더별 전류데이터를 사용하여 가선전압의 변동분 및 무부하전압, 피더별 RC 파라미터를 추정하고, 그 결과를 제시하였다.

제안된 직류변전소의 모델 및 추정기법은 지하철 변전소 실측데이터를 활용해 다양한 조건에서의 가선전압 변동폭을 예측할 수 있을 뿐만아니라, 기존 다이오드 정류방식 대신에 PWM 컨버터를 이용한 직류 전력 공급 시 제어기법에도 적용가능하다. 또한, 에너지 절감 및 가선전압 안정화를 위한 에너지 저장장치 및 회생인버터 설치시 회생 실효량 분석과 적정 용량 계산에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] S. M. Jung, H. S. Lee, K. S. Kim, H. S. Jung, H. C. Kim, and G. S. Jang, "A study on peak power reduction using regenerative energy in railway systems through DC Subsystem interconnection," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 8, No. 5, pp. 1070-1077, Sep. 2013.
- [2] IEC 60850, "Railway applications - Supply voltages of traction systems," IEC 2007.
- [3] M. Shimada, Y. Miyaji, T. Kaneko, and K. Suzuki, "Energy-saving technology for railway traction systems using onboard storage batteries," *Hitachi review*, Vol. 61, No. 7, 2012.
- [4] K. M. Son, J. H. Choi, and H. C. Kim, "Line voltage regulation of urban transit systems using supercapacitors," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 481-487, Dec. 2009.
- [5] H. M. Lee, G. D. Kim, K. B. Lee, and T. S. Kim, "Field Test of 1500V ESS for urban transit system," *The Korean Institute of Electrical Engineers summer conference*, pp. 2175-2176, July 2011.
- [6] C. H. Bae, "A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500V electric railway system," *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(5), pp. 829-838, 2009.
- [7] E. Pilo, "Power supply, energy management and catenary problems," *WIT press*, 2010.
- [8] V. H. Duong, H. A. Bastawrous, K. Lim, K. W. See, P. Zhang and S. X. Dou, "Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO4 battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares," *Journal of Power Source*, Vol. 296, No. 20, pp. 215-224, Nov. 2015.
- [9] H. He, X. Zhang, R. Xiong, Y. Xu, and H. Guo, "Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy* 39, pp. 310-318, 2012.
- [10] H. G. Kim, S. J. Heo, and G. B. Kang, "Modeling and state observer design of HEV li-ion battery," *The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, pp. 360-368, Oct. 2008.
- [11] Mathworks, *Optimization Toolbox*, Matlab 2009b.



배창한(裴昶漢)

1971년 8월 26일생. 1996년 아주대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박). 2002년~현재 한국철도기술연구원 철도안전인증연구소 형식

승인팀 선임연구원.